

УДК 629.423.31:621.316.57

КАРЗОВА О. О., к.т.н., б/з (ДНУЖТ)

Підвищення ефективності захисту електричних силових кіл електрорухомого складу

Вступ

На електровозах та електропоїздах постійного струму, які експлуатуються на залізницях України, основним апаратом захисту від струмів короткого замикання (КЗ) у колі тягових електродвигунів (ТЕД) є швидкодіючий вимикач (ШВ). Щоб подати сигнал на розмикання утримуючої котушки швидкодіючого вимикача, застосовують низьковольтні електро-механічні реле та інші пристрої, що мають відносно низький рівень надійності та відносно великі значення власного часу спрацювання.

Сумарний час спрацювання ШВ та вказаних реле при КЗ може становити декілька сотих долей секунди. За цей час в режимі КЗ можуть відбутися значні пошкодження електрообладнання.

Одним із шляхів збільшення швидкодії ШВ є побудова кіл керування на сучасній мікропроцесорній елементній базі. Тому метою даної роботи є проведення досліджень для визначення доцільності використання запропонованого автором низьковольтного пристрою на сучасній елементній базі, який реагує на струми короткого замикання.

Основний матеріал

Можливі варіанти виникнення короткого замикання в колі ТЕД показані на прикладі 8-вісного електровозу постійного струму (рис. 1).

На рис. 1:

M1-M8 – обмотки якоря тягових електродвигунів;

O31-O38 – обмотки збудження ТЕД;

0-15 – можливі точки виникнення КЗ у силовому колі електровозу;

U_M – напруга тягової контактної мережі.

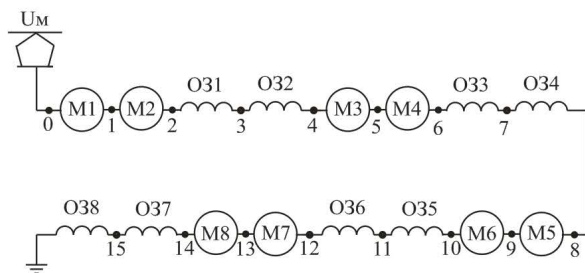


Рис. 1. Можливі варіанти виникнення КЗ при послідовному з'єднанні ТЕД 8-вісних електровозів постійного струму

При виникненні КЗ в точці 0 (рис. 1) струм зростає з великою швидкістю і досягає значних значень, тому захист виконується тільки за допомогою ШВ [1].

У випадку виникнення короткого замикання, коли між струмоприймачем та точкою КЗ ввімкнена якась кількість обмоток якоря та збудження, струм КЗ досягає усталеного значення за значно більший час, ніж у попередньому випадку внаслідок наявності в колі індуктивності обмоток тягових електродвигунів. Цей час t_0 показаний на прикладі залежності $I_{КЗ} = f(t)$ (рис. 2), яка побудована за умови, що коротке замикання виникло після першої обмотки якоря тягового електродвигуна (точка 1 на рис. 1). Вказана залежність $I_{КЗ} = f(t)$ при КЗ побудована для електровоза постійного струму ДЕ1 [2-4].

На рис. 2:

t_0 – час до досягнення струмом величини уставки ШВ.

$t_{вл}$ – власний час спрацьовування ШВ – час від моменту досягнення струмом значення уставки до моменту початку розходження контактів. Для ШВ, які встановлені на електрорухомому складі (ЕРС) постійного струму, власний час спрацьовування приблизно дорівнює 0,0015-0,003 с [5].

$t_{заг}$ – загальний час відключення аварійного струму швидкодіючим вимикачем – 0,01-0,05 с [5].

$I_{ном} = 565$ А – номінальний струм у колі.

$I_{ШВ}$ – струм уставки ШВ.

$I_{уст} = 39000$ А – усталене значення струму короткого замикання.

$I_{вими́к} = 29000$ А – максимальний струм, коли починають розмикатися контакти ШВ.

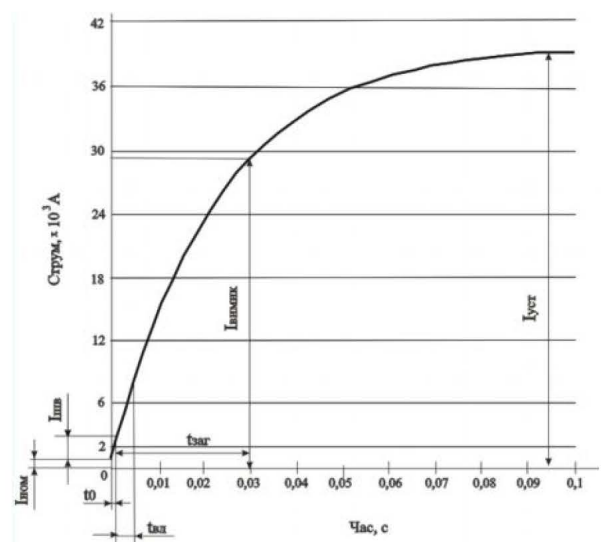


Рис. 2. Крива виникнення короткого замикання після першої обмотки якоря ТЕД

Виникнення КЗ в кінці силового кола є більш несприятливим варіантом з точки зору забезпечення захисту. У цьому випадку аварійний струм може не досягти величини уставки ШВ, або досягти її за більший час, ніж у попередніх випадках.

Захист від коротких замикань у цьому разі виконується за допомогою не тільки ШВ, а ще й диференційного реле (ДР), яке має відносно великий час спрацьовування.

На даний момент, наприклад, на електровозі ДЕ1 для захисту силових кіл від струмів КЗ використовується диференційне реле клапанного типу, струм спрацьовування (струм небалансу) якого складає не більше 150 А, а власний час спрацьовування при швидкості зростання струму вище $0,6 \cdot 10^6$ А/с не більше 0,009 с [2].

На нових електропоїздах, наприклад ЕПЛ2Т, захист від струмів короткого замикання виконують ДР на основі магнітокерованих контактів (геконів) [6]. Призначення та принцип дії таких реле співпадає з традиційними, а конструкція відрізняється. Це підвищує ефективність та термін служби комутаційних елементів в системах захисту, тому що реле з магнітокерованими контактами мають наступні переваги над електромеханічними: високу надійність комутації; довготривалий термін служби (до 10^6 – 10^7 спрацьовувань); високу швидкість (час спрацьовування 0,5–2 мс); малу вартість; високу стійкість до короточасних перенапруг (5–6-ти кратні значення номінальної напруги); малу масу та габарити; високу стабільність контактного опору.

У теперішній час є можливість використовувати пристрої на базі мікроконтролерів, враховуючи, що вартість їх стала майже однаковою з вартістю традиційної елементної бази. Функції пристроїв захисту ЕРС у разі використання електромеханічних пристроїв, герконів і мікропроцесорних аналогічні. Але перевагами останніх, в порівнянні з іншими, є суттєве збільшення швидкості, можливість уніфікації, зменшення маси та габаритів, скорочення числа обслуговуючого персоналу, зменшення витрат на експлуатацію [7]. Але при освоєнні нової елементної бази для захисної апаратури ЕРС необхідно враховувати специфічні умови експлуатації останньої. Це пояснюється тим, що в схемах не тільки захисту, а всього ЕРС застосовуються так звані тягові апарати, які повинні відповідати спеціальним вимогам [8].

При використанні пристрою захисту від КЗ на сучасній мікропроцесорній елементній базі стає можливим не тільки суттєво збільшити швидкість, а також за контролюємий параметр прийняти значення зміни швидкості зростання струму (di/dt) особливо на початку процесу короткого замикання за різних режимів роботи ЕРС на відміну від більшості експлуатуємих апаратів захисту, що реагують тільки на значення струму.

Автором запропонований наступний пристрій захисту, структурна схема якого показана на рис. 3 [9].

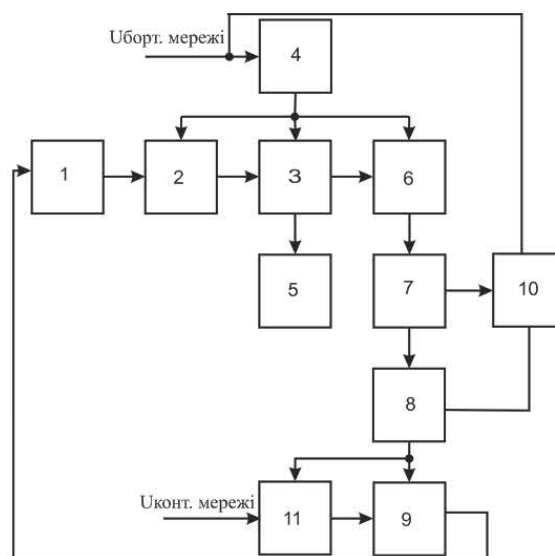


Рис. 3. Структурна схема пристрою захисту на базі мікропроцесорної техніки

Пристрій захисту на рис. 3 містить: безінерційний датчик струму, що використовується в якості елемента зчитування поточної інформації; мікроконтролер 3, що виступає в якості елемента обробки поточної інформації, яка надходить з датчика струму, і має у своєму складі аналогово-цифровий перетворювач 2; блок живлення 4; блок індикації 5; схему керування 6; ключовий елемент 7; утримуючу котушку швидкодіючого вимикача 8; коло тягових електродвигунів 9; додатковий опір 10 та контакти швидкодіючого вимикача 11.

На основі даного пристрою захисту (рис. 3) можливо виконати пристрій, за

допомогою якого збільшиться швидкодія захисту електрообладнання від короткого замикання.

Складові такого пристрою повинні мати такі характеристики, щоб забезпечити високу точність роботи та швидкодію.

Час спрацьовування датчика струму складає $t_{дс}=1$ мкс [10]. Час обробки одного сигналу мікроконтролером – $t_{мкк}=28$ мкс [11]. Між обробкою сигналів є час паузи, що дорівнює $t_{п}=2,8$ мкс.

Тоді час спрацьовування всієї низьковольтної схеми захисту $t_{заг}$ можна розрахувати як:

$$t_{заг} = t_{дс} + t_{мкк} + t_{п}, \quad (1)$$

$$t_{заг} = 1 + 28 + 2,8 = 31,8 \text{ мкс.}$$

На рис. 4 показана різниця при використанні електромеханічних ДР та запропонованого пристрою захисту на основі сучасного мікроконтролера для захисту силової схеми ЕРС постійного струму від струмів КЗ. Для прикладу взято криву залежності струму КЗ від часу при послідовному з'єднанні тягових електродвигунів ЕД-141У1 електровозу ДЕ1, напрузі контактної мережі 3000 В і варіанті виникнення КЗ після другої обмотки збудження ТЕД (точка 4 на рис. 1). Точка 4 обрана тому, що при КЗ у цій точці значення di/dt приблизно дорівнює значенню di/dt за паспортними даними диференційного реле типу РДЗ-216, що застосовується у теперішній час. Цей вибір дає право порівнювати час спрацьовування запропонованого захисного пристрою $t_{заг}$ із часом спрацьовування ДР $t_{др}$.

Усталене значення струму при такому варіанті виникнення короткого замикання $I_{уст}=12$ кА. У цьому випадку для захисту в існуючих схемах ЕРС застосовується електромеханічне диференційне реле, час спрацьовування якого $t_{др}=0,009$ с [2]. При використанні запропонованого ПЗ час спрацьовування зменшується на:

$$t_{др} - t_{заг} = 0,009 - 0,0000318 = 0,00879 \text{ с.}$$

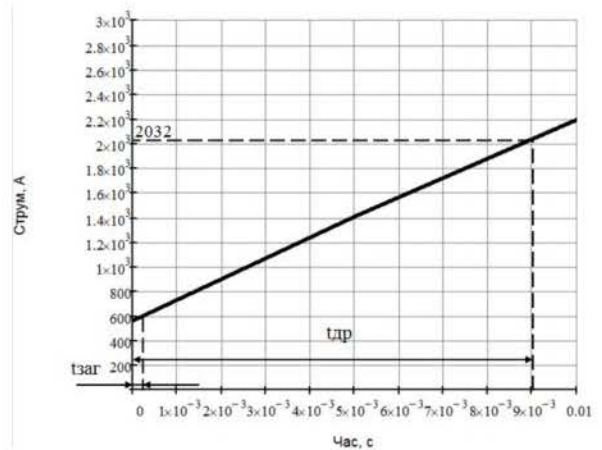


Рис. 4. Збільшений за масштабом графік часу спрацьовування низьковольтного захисту при виникненні КЗ після обмотки збудження другого ТЕД при їх послідовному з'єднанні

Технічна ефективність результатів даної роботи зумовлена зменшенням значення струму КЗ, який проходить по силовому колу від моменту виникнення КЗ до моменту розриву кола за допомогою ШВ.

Максимальний струм, що розривається контактами ШВ при діючих ДР та при запропонованому пристрою захисту (рис. 5), визначено на прикладі залежності з рис. 4.

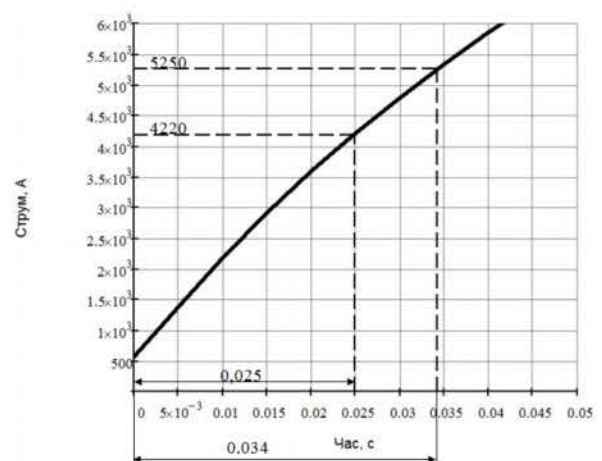


Рис. 5. Визначення максимального струму, що розривається контактами ШВ при діючих ДР та при запропонованому ПЗ

Повний час спрацьовування захисту t'_n при ДР:

$$t'_n = t_{шв} + t_{др}, \quad (2)$$

де $t_{шв}=0,025$ с – час спрацьовування ШВ [2].

Тоді $t'_n=0,025+0,009=0,034$ с.

Повний час спрацьовування захисту при використанні запропонованого пристрою $t''_n=t_{шв}=0,025$ с, бо час спрацьовування низьковольтної схеми захисту складає усього 31,8 мкс, тобто настільки малий, що ним можна знехтувати. Згідно з рис. 5 при $t'_n=0,034$ с максимальний струм, що розривається контактами швидкодіючого вимикача при КЗ у точці 4 (рис. 1), дорівнює 5250 А.

Відповідно у випадку виникнення КЗ у точці 4 при використанні пристрою захисту, пропонуемого автором, струм, що розмикається, дорівнює 4220 А.

Від значення струму КЗ залежить об'єм пошкоджень, які зумовлені термічною дією струму короткого замикання.

Термічна дія струму КЗ характеризується величиною $A_{терм}$ [12]:

$$A_{терм} \sim I_{кз.сер}^2 \cdot \Delta t_n, \quad (3)$$

де $I_{кз.сер}$ – середній струм КЗ, який проходить через електрообладнання на протязі певного інтервалу часу t_n .

При існуючому захисті і напрузі контактної мережі 3000 В:

$$A'_{терм} \sim I_{кз.сер}^{2'} \cdot t'_n, \quad (4)$$

де $I_{кз.сер}'$ – середнє значення відключаємого струму КЗ при наявності ДР.

$$A'_{терм} \sim \left(\frac{5250}{2} \right)^2 \cdot 0,034 = 234281 \text{ А}^2 \cdot \text{с}.$$

При запропонованому пристрої захисту і напрузі контактної мережі 3000 В:

$$A''_{терм} \sim I_{кз.сер}^{2''} \cdot t''_n, \quad (5)$$

де $I_{кз.сер}''$ – середнє значення відключаємого струму КЗ при наявності запропонованого пристрою захисту.

$$A''_{терм} \sim \left(\frac{4220}{2} \right)^2 \cdot 0,025 = 111303 \text{ А}^2 \cdot \text{с}.$$

Відношення середніх значень параметра $A_{терм}$ при новому пристрої захисту та при існуючому захисті:

$$\frac{111303}{234281} = 0,47.$$

Висновки

Запропонований низьковольтний пристрій доцільно використовувати для захисту кін тягових електродвигунів, що сприяє підвищенню надійності захисту, зменшенню струму короткого замикання, який розривається захисними апаратами, і відповідно зменшенню пошкоджень електрообладнання.

Запропонований пристрій захисту може бути використаний на всіх видах електрорухомого складу після проведення відповідних досліджень для визначення уставки за критерієм швидкості зростання струму.

Список літератури:

1. Тихменев Б. Н. Подвижной состав электрифицированных железных дорог. Теория работы электрооборудования. Электрические схемы и аппараты: учебн. для вузов ж.-д. трансп. / Б. Н. Тихменев, Л. М. Трахтман. – [4-е изд., доп. и перераб.]. – М.: Транспорт, 1980. – 471 с.
2. Электровоз магистральный ДЭ-1. Техническое описание. ЗТП.000.020-03 ТО. – 1999. – 188 с.

3. Дубинець Л. В. Швидкість зміни струму при короткому замиканні в силових колах електрорухомого складу з урахуванням вихрових струмів / Л. В. Дубинець, О. О. Карзова, Ю. С. Бондаренко // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2010. – Вип. 34. – С. 69-72.

4. Карзова О. О. Визначення швидкості зміни струму у колах тягових двигунів електрорухомого складу при різних режимах роботи / О. О. Карзова // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2008. – № 24. – С. 57-60.

5. Устройство и ремонт электровозов постоянного тока. Учебн. для техн. школ ж.-д. трансп. / С. А. Алябьев и др. – М.: «Транспорт», 1977. – 464 с.

6. Электропоезд ЭПЛ2Т. Руководство по эксплуатации. Часть 1. Описание и работа. 1115.00.00.000 РЭ. – 99 с.

7. Устищенко, Д. В. Мікропроцесорний пристрій захисту електричних двигунів від струмів короткого замикання / Д. В. Устищенко // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2010. – Вип. 32. – С. 184-185.

8. Апарати електричні тягові. Загальні технічні умови: ДСТУ 2773-94 (ГОСТ 9219-95); Введ. 01.07.96. - К.: Держстандарт України, 1996. – 74 с.

9. Пат. 65719 Україна, МПК' (2011.01) H01H 83/00. Електронний блок захисту тягових електродвигунів електровоза постійного струму / Карзова О. О. (Україна) ; заявник та патентовласник Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна. – № u 2011 06857 ; заявл. 31.05.2011; опубл. 12.12.11, Бюл. № 23.

10. Техническая документация на датчики тока и напряжения LEM [Электрон. ресурс] / Режим доступа:

<http://www.lem.com/docs/products/la%20100-p%20e.pdf>.

11. PIC12F6XX: 8-выводные высокопроизводительные FLASH-микроконтроллеры. Техническая документация [Электрон. ресурс] / Режим доступа: <http://www.microchip.ru/cdrom/ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/41190c.pdf>.

12. Сахаров П. В. Проектирование электрических аппаратов (Общие вопросы проектирования): учебн. пос. для студ. электротехн. вузов. / П. В. Сахаров. – М.: Энергия, 1971. – 560 с.

АНОТАЦІЇ:

В роботі за допомогою проведеного дослідження визначено доцільність використання в схемах електрорухомого складу постійного струму запропонованого автором низьковольтного пристрою захисту від коротких замикань на сучасній елементній базі, який реагує не тільки на струми короткого замикання але й на швидкість зміни струму.

Ключові слова: коротке замикання, пристрій захисту, тягові електродвигуни, швидкість зростання струму, електрорухомий склад, електровоз, час спрацювання.

В статье с помощью проведенного исследования определена целесообразность использования в схемах электроподвижного состава постоянного тока предложенного автором низковольтного устройства защиты от коротких замыканий на современной элементной базе, которое реагирует не только на токи короткого замыкания но и на скорость изменения тока.

Ключевые слова: короткое замыкание, устройство защиты, тяговые электродвигатели, скорость нарастания тока, электроподвижной состав, электровоз, время срабатывания.

In an article with the study determined the feasibility of using in the circuits electromotive structure proposed by the author DC low-voltage protection device against short circuits on modern base that responds not only to the short-circuit currents but also on the rate of change of current.

Keywords: short-circuit protection device, traction motors, the growth rate of current, electromotive composition, electric, response time.